

метода конечных элементов [9, 10], путем сравнения данных промышленного эксперимента проведенного на «Опытной установке аглоцеха для спекания агломерата», с результатами имитационного моделирования. Проверка подтвердила адекватность модели. По результатам эксперимента получены акт и протокол проверки адекватности модели на МК «Запорожсталь».

Анализ данных имитационного моделирования и результатов натурального эксперимента показали, что погрешность моделирования составляет 2,61 %, последнее свидетельствует о возможности использования указанной модели для проведения численных экспериментов с целью оптимизации теплового режима процесса спекания.

#### Литература

1. Вегман, Е. Ф. Процесс агломерации [Текст] / Е. Ф. Вегман. — М.: Металлургия, 1963. — 153 с.
2. Сигов, А. А. Агломерационный процесс [Текст] / А. А. Сигов, В. А. Шурхал. — Киев: Техника, 1969. — 232 с.
3. Савельев, С. Г. Математическое моделирование в исследовании процессов производства окискованного сырья [Текст]: сб. науч. пр. / С. Г. Савельев, Я. А. Стойкова // Вісник КрНУ. — 2012. — № 34. — С. 44–47.
4. Цаплин, А. И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии [Текст] / А. И. Цаплин, И. Л. Никулин. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. — 203 с.
5. Калашников, С. Н. Математическое моделирование тепло-массообменных процессов в металлургических агрегатах на основе объектно-ориентированной технологии [Текст]: дис. ... д. т. н. / С. Н. Калашников. — Новокузнецк, 2002. — 278 с.
6. Боковиков, Б. А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата [Текст] / Б. А. Боковиков, В. В. Брагин, В. М. Малкин и др. // Сталь. — 2010. — № 9. — С. 84–87.
7. Фролов, Ю. А. Теплотехническое исследование процесса агломерации и совершенствование технологии и техники для производства агломерата [Текст]: автореф. дис. ... д. т. н. / Ю. А. Фролов. — Екатеринбург, 2005. — 49 с.
8. Елисеев, А. А. Исследование тепло-массообменных процессов при агломерации шихты [Текст]: дис. канд. техн. наук / А. А. Елисеев. — Череповец, 2006. — 165 с.
9. Мных, А. С. Решение задачи распределения температуры в единичном объеме агломерационного слоя методом конечных элементов с учетом внутреннего источника теп-

ла [Текст] / А. С. Мных // Збірник наукових праць ДДТУ. — 2014. — № 2(25). — С. 47–51.

10. Мных, А. С. Синтез трехмерной модели теплового режима процесса спекания агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных // Вісник КрНУ. — 2014. — № 38. — С. 44–47.

#### АНАЛІЗ АДЕКВАТНОСТІ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ АГЛОМЕРАЦІЇ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ШИХТИ

В роботі проведено аналіз поточного стану питання моделювання агломераційного процесу та наведені результати моделювання процесу спікання шихти на розробленій авторами кінцево-елементній тепловій моделі.

Проаналізовані результати моделювання й натурального експерименту, підтверджено адекватність представленої моделі. Похибка моделювання свідчить про можливість використання моделі для проведення чисельних експериментів.

**Ключові слова:** сегрегація, імітаційна модель, адекватність моделі, тепловий режим, горизонт шару, шихта.

*Мных Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и энергетического менеджмента, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: mnikh.a@yandex.ua.*

*Пазюк Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.*

*Мных Ирина Николаевна, кандидат технических наук, кафедра теплоэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: irinamnih@yandex.ua.*

*Мных Антон Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки та енергетичного менеджменту, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Пазюк Михайло Юрійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Мных Ирина Миколаївна, кандидат технічних наук, кафедра теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Mnych Anton, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: mnikh.a@yandex.ua.*

*Pazuk Mikhail, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine. Mnych Irina, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: irinamnih@yandex.ua*

УДК 620.92:644.62

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.36786

**Кравченко В. П.,  
Кравченко Е. В.**

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛОЩАДИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*С увеличением площади солнечных коллекторов доля полезной энергии, обеспечиваемой за год солнечной установкой (СУ), и ее стоимость растут. Недостающая энергия покрывается за счет органического топлива либо электроэнергии. В работе проведена оптимизация площади солнечных коллекторов относительно минимума приведенных годовых затрат для СУ, работающих в течение теплой половины или весь год.*

**Ключевые слова:** площадь солнечных коллекторов, приведенные годовые затраты, длительность работы.

### 1. Введение

Возобновляемые источники энергии находят все более широкое применение [1]. Наиболее популярным

является использование солнечных установок (СУ) для горячего водоснабжения [2]. Количество вводимых в действие установок постоянно кастет, особенно на юге Украины. При проектировании таких установок

в первую очередь возникает необходимость определения требуемой площади солнечных коллекторов (СК). При использовании рекомендаций ведущих европейских производителей оборудования (Viessmann, Buderus) [3, 4] также остаются вопросы. Приводимые данные по солнечной инсоляции имеют неопределенность. Так годовое количество энергии, падающее на горизонтальную поверхность в южных районах Украины — 1350 кВт ч/м<sup>2</sup>, не может использоваться в качестве полезно переданной теплоносителю энергии, необходимой для расчета площади СК. Основным недостатком СУ является их высокая стоимость. Для улучшения экономических показателей при технико-экономическом обосновании использования СУ необходимо учитывать экологическую составляющую затрат, методика расчета которой отсутствует. Исходя из этого, на сегодняшний день остается актуальной разработка рекомендаций по расчету площади солнечных коллекторов и экологической составляющей затрат.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Солнечная активность имеет существенную сезонную неравномерность. В [3] площадь коллекторов предлагается определять по номограмме в зависимости от количества требуемой горячей воды. Такая номограмма должна рассчитываться для каждого района со своей инсоляцией. В [4] для определения площади СК предлагается использовать значение удельной мощности 500 Вт/м<sup>2</sup>. Тут же указывается, что для повышения безопасности следует повысить это значение до 600 Вт/м<sup>2</sup>. В результате получится заниженная площадь СК, которая даже в пике инсоляции может не обеспечить требуемую мощность. Эта неконкретность и отсутствие привязки к расположению СУ говорит о том, что определение оптимальной площади солнечной установки (СУ) продолжает оставаться важным вопросом. Автор работы [5] только касается вопроса определения площади СК, а в таком фундаментальном труде [6] вопросу теплопроизводительности коллектора вообще не уделяется внимания. Практическое использование предлагаемых методик из-за сложности представляется весьма затруднительным. Вопросу выбора угла наклона СК в зависимости от расположения установки уделяется достаточное внимание [7, 8].

В нормативном документе [9] площадь СК предлагается определять для каждого месяца и выбирать наибольшую. Такой подход представляется не обоснованным, а главное экономически нецелесообразным.

С увеличением площади СК растет стоимость СУ и доля энергии, которая будет покрываться за ее счет. В летние месяцы будет перепроизводство энергии с удорожанием средств защиты. Высокая стоимость СУ не сможет компенсироваться экономией топлива. Поэтому должна быть предложена методика определения оптимальной площади СК и, соответственно, мощности СУ.

В качестве технико-экономического критерия оптимизации энергетических установок обычно принимаются годовые приведенные затраты [10]. Причем, указывается, что должна учитываться экологическая составляющая. Однако, что собой должна представлять эта составляющая не указывается.

## 3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — солнечная установка горячего водоснабжения с плоскими солнечными коллекторами.

Целью работы является разработка метода и оптимизация площади солнечных коллекторов для заданного потребителя в зависимости от длительности работы СУ.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать методику технико-экономической оптимизации с учетом экологической составляющей затрат.
2. Провести оптимизацию площади солнечных коллекторов для заданной мощности теплопотребителя в зависимости от длительности эксплуатации солнечной установки.

## 4. Методика и результаты технико-экономической оптимизации при эксплуатации СУ в течение теплой половины года

На рис. 1 представлено изменение среднесуточного количества теплоты, переданной горячей воде, за теплые полгода при угле наклона 25° [8]. Этот угол обеспечивает максимальное количество энергии, переданное теплоносителю в течение теплой половины года.

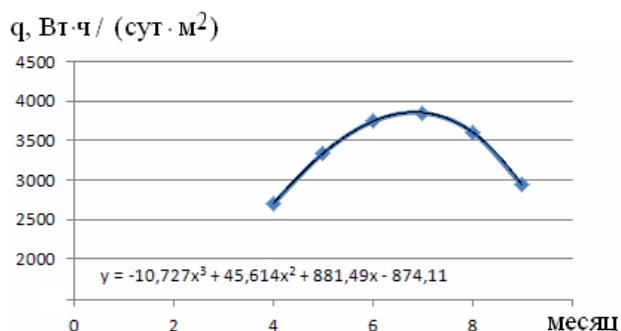


Рис. 1. Изменение среднесуточной полезной энергии в течение полугодия

Примем, что требуемая тепловая мощность горячего водоснабжения будет обеспечиваться солнечной установкой в июле, т. е.  $q_{тр}^{мес} = q_7^{мес}$ . Тогда доля требуемой энергии, обеспечиваемая СУ за полгода будет равна:

$$\varepsilon = \frac{\sum_1^6 q_i^{мес}}{q_{тр}^{мес} \cdot 6}, \tag{1}$$

где  $\sum_1^6 q_i^{мес}$  — суммарное количество теплоты, обеспечиваемое СУ за рассматриваемый период;  $q_{тр}^{мес}$  — требуемое месячное количество теплоты.

Оставшееся количество теплоты должно обеспечиваться вторичным топливом: например, природным газом:

$$q_{нг} = q_{тр} \cdot (1 - \varepsilon). \tag{2}$$

Требуемое количество природного газа:

$$g_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{пр}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{котла}}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  — теплота сгорания природного газа. Принято для природного газа Шебелинского месторождения  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35 \text{ МДж/м}^3$  [11];  $\eta_{\text{котла}}$  — КПД котла. Принято  $\eta_{\text{котла}} = 89,8 \%$  [12].

Указанные значения, относящиеся к солнечной энергии, соответствуют площади коллектора  $1 \text{ м}^2$ . Определим расчетные приведенные затраты [10]:

$$З = e_{\text{н}} \cdot К + Э, \quad (4)$$

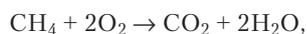
где  $e_{\text{н}}$  — нормативный коэффициент окупаемости,  $e_{\text{н}} = 0,15$ .  $К$  — капитальные затраты. В нашем случае — это стоимость  $1 \text{ м}^2$  солнечного коллектора. Для анализа принято использование плоских солнечных коллекторов производства «Акватех» (г. Симферополь). Стоимость коллектора составляет  $371 \text{ \$}$  [13]. При полезной площади коллектора  $1,8 \text{ м}^2$  удельная стоимость коллектора составит  $К = 371/1,8 = 206 \text{ \$/м}^2$ .  $Э$  — эксплуатационные годовые затраты в рассматриваемой установке.

Для сопоставимости варианты должны приводиться к одинаковому уровню вредного воздействия на окружающую среду или следует учитывать дополнительные затраты для осуществления мероприятий по защите окружающей среды. Таким образом, годовые затраты будут складываться из стоимости затраченного газа, электроэнергии на привод насоса и экологического налога за выбросы вредных веществ. Учитывая низкий расход электроэнергии, вследствие малой скорости теплоносителя, а также то что в рассматриваемом диапазоне изменения мощности СУ мощность насоса изменяется незначительно, затратами на электроэнергию можно пренебречь:

$$Э = g_{\text{пр}} \cdot C_{\text{пр}} + З_{\text{экол}}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{пр}}$  — стоимость природного газа. Принято  $C_{\text{пр}} = 0,56 \text{ \$/м}^3$  [14];  $З_{\text{экол}}$  — величина экологического налога за выбросы углекислого газа.

При сжигании природного газа образуется  $\text{CO}_2$ , выбросы которого согласно Киотскому протоколу лимитируются. Цена на квоты на рынке колеблется в районе  $15\text{--}17 \text{ евро}$  за  $1 \text{ тонну } \text{CO}_2$  [15]. В дальнейших расчетах принято  $C_{\text{CO}_2} = 20 \text{ \$/т } \text{CO}_2$ . При сжигании  $1 \text{ м}^3$  природного газа ( $\text{CH}_4$ ) согласно уравнению:



получается:

$$1 \text{ м}^3 = (12 + 32)/22,4 = 1,964 \text{ кг } \text{CO}_2.$$

Таким образом,

$$З_{\text{экол}} = g_{\text{пр}} \cdot 1,964 \cdot 20/1000 = g_{\text{пр}} \cdot 0,0393 \text{ \$}.$$

К тому же, согласно статьи 243.1 Налогового кодекса Украины, ставка налога за выбросы в атмосферный воздух для двуокиси углерода равна  $0,24 \text{ грн/т}$ . Проведем расчет изменения расчетных приведенных затрат в за-

висимости от мощности (площади) солнечной установки. Угол наклона коллектора  $25^\circ$ . Примем мощность СУ, равную требуемой  $q_{\text{тр}} = q_7 = 3850,32 \text{ Вт ч/сут}$ .

За полгода потребуются произвести:

$$Q_{\text{тр}} = q_{\text{тр}} (30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30) = q_{\text{тр}} \cdot 181 = 704609 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 704,609 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 2536,59 \text{ МДж}.$$

Доля, полученной от солнца энергии:

$$\varepsilon = 615,6/704,6 = 0,874.$$

Требуемое дополнительное количество энергии от котла:

$$Q_{\text{пр}} = 704,6(1 - 0,874) = 89,019 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Соответствующее количество природного газа:

$$g_{\text{пр}} = (89,019 \cdot 3600)/(35000 \cdot 0,898) = 10,196 \text{ м}^3.$$

Эксплуатационные затраты:

$$Э = 10,196 \cdot (0,56 + 0,0393) = 6,11 \text{ \$}.$$

Годовые приведенные затраты:

$$З = 0,15 \cdot 206 + 6,11 = 37,0 \text{ \$}.$$

Увеличение доли солнечной энергии в балансе потребления может быть достигнуто увеличением площади коллекторов. При этом расход газа снизится. Рассмотрим случай, когда СУ обеспечит требуемую потребность в июне. Необходимая площадь коллектора будет равна:

$$F_{\text{ск}} = \frac{q_7^{\text{сп. сут}}}{q_6^{\text{сп. сут}}} = \frac{3850,3}{3740,667} = 1,029 \text{ м}^2.$$

При этом полезное количество теплоты в каждом месяце увеличится в  $1,029$  раз (рис. 2). Избытки теплоты, произведенные в июле, не будут использованы. Доля теплоты, обеспечиваемая СУ, составит:

$$\varepsilon = \frac{q_4^{\text{сп. сут}} \cdot 30 + q_5^{\text{сп. сут}} \cdot 31 + q_6^{\text{сп. сут}} \cdot (30+31) + q_8^{\text{сп. сут}} \cdot 31 + q_9^{\text{сп. сут}} \cdot 30}{q_7^{\text{сп. сут}} (30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30)} = \frac{630,14}{704,61} = 0,894.$$

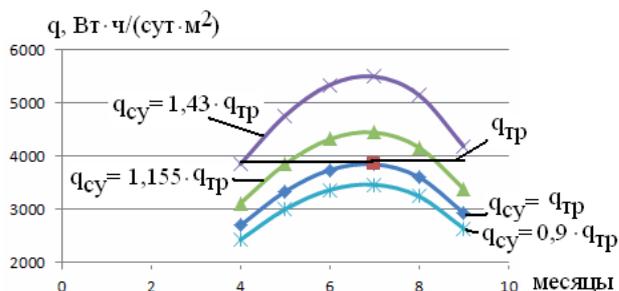


Рис. 2. К определению доли энергии, покрываемой солнечной установкой:  $q_{\text{тр}}$  — требуемая среднесуточная мощность;  $q_{\text{су}}$  — среднесуточная мощность солнечной установки

Дальнейшие расчеты идентичны.

Рассмотрим вариант уменьшения доли обеспечиваемой СУ энергии, уменьшая площадь солнечных коллекторов. Уменьшение площади приведет к снижению стоимости СУ и пропорциональному уменьшению вырабатываемой ею энергии. Снизим площадь коллектора на 10 %, т. е. используется 0,9 м<sup>2</sup> солнечного коллектора. Тогда:

$$q_7^{cp.сут} \cdot 0,9 = 3850,323 \cdot 0,9 = 3465,29 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

$$\sum (q_i^{cp.сут} \cdot \tau_{сут,i}) = 615 \cdot 0,9 = 554,03 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Доля энергии, покрываемой СУ:

$$\varepsilon = \frac{554,03}{704,6} = 0,786.$$

Дополнительное количество тепла от газа:

$$q_{пг} = 704,61 \cdot (1 - 0,786) = 150,58 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Соответствующее количество природного газа:

$$q_{пг} = \frac{150,58 \cdot 3600}{35000 \cdot 0,898} = 16,65 \text{ м}^3.$$

Годовые приведенные затраты:

$$З = 0,15 \cdot 0,9 \cdot 206 + 16,65 \cdot (0,56 + 0,0393) = 37,77 \text{ \$}.$$

На рис. 3 приводится зависимость годовых приведенных затрат от доли потребляемой энергии, обеспечиваемой солнечной установкой.

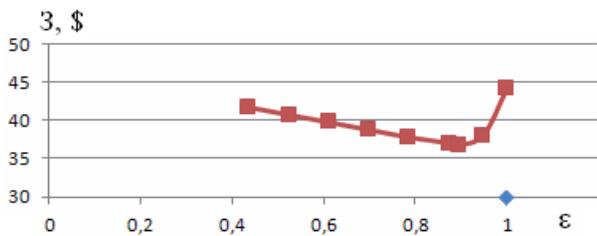


Рис. 3. Зависимость годовых приведенных затрат от доли требуемой энергии, обеспечиваемой солнечной установкой

Из анализа приведенных на рис. 3 данных следует, что оптимальной долей энергии, обеспечиваемой солнечной установкой, при эксплуатации в течение теплой половины года, является 89,4 %. Этой доле соответствует мощность солнечной установки, полностью обеспечивающая теплотребителя при инсоляции в июне. То есть, оптимальным является рассчитывать площадь солнечных коллекторов по удельной мощности в июне. Отметим также, что при изменении стоимости выбросов CO<sub>2</sub> от 20 до 60 \$/т значение оптимальной мощности не меняется.

Следует также отметить, что доля экологической составляющей в приведенных затратах равна 7,8 %.

### 5. Расчет оптимальной мощности солнечной установки при круглогодичной работе

На рис. 4 представлено изменение среднесуточного количества теплоты, переданной горячей воде, в течение года при угле наклона коллектора 40° [8]. Этот угол обеспечивает максимальное количество полезной энергии, переданной теплоносителю в течение года работы.

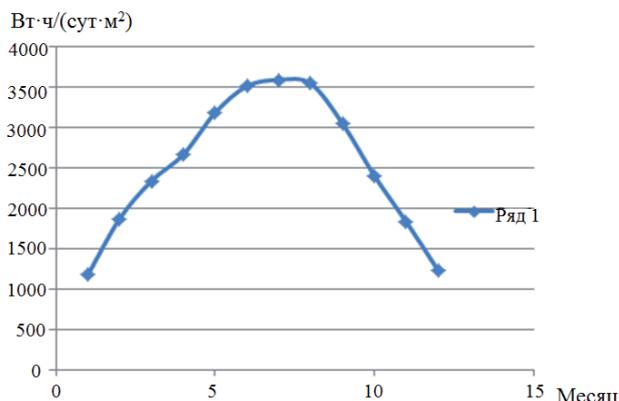


Рис. 4. Изменение среднесуточной полезной энергии, передаваемой теплоносителю в солнечной установке при угле наклона коллекторов 40°

Примем, что требуемая тепловая мощность горячего водоснабжения равна максимальной мощности солнечной установки в июле:  $q_{тр}^{мес} = q_7^{мес}$ . Тогда доля требуемой энергии, обеспечиваемая СУ за год будет равна:

$$\varepsilon = \frac{\sum_1^{12} q_i^{мес}}{q_{тр}^{год} \cdot 12} = \frac{925,253 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{1310,044 \text{ кВт} \cdot \text{ч}} = 0,706,$$

где  $\sum_1^{12} q_i^{мес}$  — суммарное количество теплоты, обеспечиваемое СУ за год;  $q_{тр}^{год} = 3589,16 \cdot 365 = 1310044 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  — требуемое количество теплоты за год.

Оставшееся количество теплоты должно обеспечиваться природным газом:

$$q_{пг} = q_{тр} (1 - \varepsilon) = 384,791 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Требуемое количество природного газа:

$$g_{пг} = \frac{q_{пг}}{Q_{н}^p \cdot \eta_{котла}} = \frac{384,791 \cdot 3600}{35000 \cdot 0,898} = 44,07 \text{ м}^3.$$

Эксплуатационные затраты составят:

$$\mathcal{E} = 44,07 \cdot (0,56 + 0,0393) = 6,11 \text{ \$}.$$

Годовые приведенные затраты:

$$З = 0,15 \cdot 206 + 6,11 = 37,0 \text{ \$}.$$

Увеличение доли солнечной энергии в балансе потребления может быть достигнуто увеличением площади

коллекторов. При этом расход газа снизится. Рассмотрим случай, когда СУ обеспечит потребность в июне. Необходимая площадь коллектора будет равна:

$$F_{\text{СК}} = \frac{q_7^{\text{ср. сут}}}{q_6^{\text{ср. сут}}} = \frac{3589}{3512} = 1,022 \text{ м}^2.$$

При этом полезное количество теплоты в каждом месяце увеличится в 1,022 раз (рис. 3). Избытки теплоты, произведенные в июле, не будут использованы.

$$\varepsilon = \frac{1,022 \cdot \sum_{i=1}^5 (q_i^{\text{ср. сут}} \cdot \tau_{\text{сут}, i}) + q_6^{\text{ср. сут}} \cdot (30+31) + 1,022 \sum_{i=8}^{12} (q_i^{\text{ср. сут}} \cdot \tau_{\text{сут}, i})}{q_7^{\text{ср. сут}} 365} = \frac{942,0}{1310,04} = 0,719.$$

Доля теплоты, обеспечиваемая СУ, составит:

Дальнейшие расчеты идентичны предыдущим.

В табл. 1 приводится полученная зависимость годовых приведенных затрат от доли потребляемой энергии, обеспечиваемой солнечной установкой. Или от среднесуточной полезной энергии, получаемой в разные месяцы года. Приведенный в табл. 1 коэффициент показывает, как определяется площадь солнечных коллекторов. При  $k = 1$  площадь СК определяется как мощность потребителя, деленная на удельную полезную энергию, получаемую от одного метра солнечного коллектора в июле (максимальную). Коэффициенты, меньшие единицы, показывают, что площадь СУ определена, как соответствующая доля от рассчитанной по июльской удельной полезной энергии.

**Таблица 1**

Зависимость удельных годовых приведенных затрат от доли потребляемой энергии, обеспечиваемой солнечной установкой

Кoeffициент, $k$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,022	1,128	1,347
Месяц	—	—	—	—	—	7	6	5	4
Доля, $\varepsilon$	0,353	0,424	0,494	0,565	0,636	0,706	0,719	0,768	0,830
Приведенные затраты, $\$/\text{м}^2$	606,7	579,9	553,1	526,2	499,4	472,5	468,6	459,7	468,5

Из анализа приведенных в табл. 1 данных следует, что оптимальной долей энергии, обеспечиваемой солнечной установкой, соответствующей минимальным приведенным затратам, при эксплуатации в течение всего года является 76,8 %. Этой доле соответствует мощность СУ, полностью обеспечивающая теплопотребителя при инсоляции в мае. Следует отметить, что при изменении стоимости выбросов  $\text{CO}_2$  от 20 до 60  $\$/\text{т}$  значение оптимальной мощности не меняется.

## 6. Выводы

1. Предложена методика определения оптимальной площади солнечных коллекторов на основе приведенных

годовых затрат с учетом экологической составляющей, учитывающей плату за вредные выбросы в окружающую среду.

2. При работе солнечной установки на юге Украины в течение теплой половины года при расчете площади солнечной установки следует использовать удельную среднесуточную полезную энергию в июне, равную 3,74 кВт · ч/( $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$ ), получаемую при угле наклона солнечных коллекторов 25°.

3. При круглогодичном использовании солнечной установки при расчете площади коллекторов следует пользоваться удельной среднесуточной полезной энергией в мае, равной 3,182 кВт · ч/( $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$ ), получаемую при угле наклона солнечных коллекторов 40°.

## Литература

- Черкасов, М. И. Проблемы и пути решения фото-энергетики России [Текст] / М. И. Черкасов, В. В. Борячок, А. Д. Хафизов // Energy Fresh. — 2011. — № 3/5. — С. 16–18.
- Rafferty, K. Domestic hot water heating [Text] / K. Rafferty // GHC Bulletin. — September 2001. — P. 18–22.
- Гелиотехника Logasol для горячего водоснабжения и поддержки отопления. Документация для проектирования [Текст]. — Одесса: Buderus, 04/2008. — 120 с.
- Руководство по проектированию систем солнечного тепло-снабжения Viessmann [Текст]. — К.: Злато-Граф, 2010. — 189 с.
- Brinkworth, B. Reference area for solar collectors [Text] / B. Brinkworth // Solar Energy. — 1996. — Vol. 56, № 4. — P. 373. doi:10.1016/0038-092x(96)89366-2
- Dehra, H. Solar Energy Absorbers [Text] / H. Dehra // Solar Collectors and Panels, Theory and Applications. — Sciyo, 2010. — P. 111–134. doi:10.5772/10334
- Koronakis, P. S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area [Text] / P. S. Koronakis // Solar Energy. — 1986. — Vol. 36, № 3. — P. 217–225. doi:10.1016/0038-092x(86)90137-4
- Кравченко, Е. В. Определение оптимальной мощности солнечной установки для горячего водоснабжения [Текст] / Е. В. Кравченко // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие отраслевой автоматизации, информационной и энергосберегающей технологий-2013. Современное состояние, проблематика и перспективы», 20 декабря 2013 г. — Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2013. — С. 3.7–3.13.
- В СН52-86. Установки солнечного горячего водоснабжения. — Нормы проектирования. — М.: Гражданстрой СССР, 1988. — 13 с.
- ГКД 340.000.001-95. Методика визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику [Текст]: Затв. наказом Міністерства України від 23.02.95 № 1 та введена в дію з 01.03.95. — Київ, 1995. — 34 с.
- Теплотехнический справочник. Т. 1 [Текст] / под ред. В. Н. Юрнева, П. Д. Лебедева. — М.: Энергия, 1975. — 744 с.
- Газовый котел GAZ5000-zwe-24-5-MFK [Электронный ресурс] / Каталог оборудования. — Режим доступа: \www/URL: http://klimat-s.com.ua/kotli/bosch/gaz-5000---zwe-24-5-mfk. — 12.01.2015.
- Плоский солнечный коллектор AFL-AL [Электронный ресурс] / Каталог товаров. — Режим доступа: \www/URL: http://simferopol.prom.ua/p19227458-ploskij-solnechnyj-kollektor.html. — 12.01.2015.
- Про затвердження Роздрібних цін на природний газ, що використовується для потреб населення, Міжнародного дитячого центру «Артек» і Українського дитячого центру «Молода гвардія» [Електронний ресурс]: Постанова НКРЕУ від 13.07.2010 № 812. — Режим доступу: \www/URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0507-10. — 12.01.2015.
- Лесков, С. Киотский протокол включился [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: http://www.eco-mir.ru/ecology/action/75/. — 12.01.2015.

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛОЩІ ПЛОСКИХ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

З підвищенням площі сонячних колекторів частка корисної енергії, що забезпечується впродовж року сонячною установкою (СУ), та її вартість зростають. Недостатня енергія покривається за рахунок органічного палива чи електроенергії. В роботі проведена оптимізація площі сонячних колекторів відносно мінімуму приведених річних витрат для СУ, які працюють впродовж теплої половини чи весь рік.

**Ключові слова:** площа сонячних колекторів, приведені річні витрати, тривалість функціонування.

*Кравченко Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної екології та гідрогазодинаміки, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: vpkra@rambler.ru.*

*Кравченко Егор Владимирович, аспірант, кафедра атомних електростанцій, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: evksst@gmail.com.*

*Кравченко Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної екології та гідрогазодинаміки, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Кравченко Егор Владимирович, аспірант, кафедра атомних електростанцій, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Kravchenko Vladimir, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: vpkra@rambler.ru.*

*Kravchenko Iegor, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: evksst@gmail.com*

УДК 621.371:621.311.4

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.36950

Дорошенко О. І.

**ПРО ОПТИМАЛЬНИЙ КОЕФІЦІЄНТ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

*Спираючись на фізику електропередачі в електроенергетичних системах, у статті пропонується при розрахунках їх режимів використовувати не амплітудне значення реактивної потужності, яким оперують при цьому, зазвичай, а його діюче значення. Доведено, що така практика існує у наш час через те, що на державному рівні існують нормативні документи, які вимагають плату споживачів за реактивну електроенергію.*

**Ключові слова:** електроенергія, електропостачання, реактивне навантаження, коефіцієнт реактивної потужності.

**1. Вступ**

З теоретичних основ електроенергетики відомо, що електрична енергія (ЕЕ), фізично, є енергією електромагнітного поля електроенергетичної системи (ЕЕС), яке створюється одночасною дією на її діелектричне середовище напруги і струму провідності струмоведучих частин усіх об'єктів (електроустановок) системи. При цьому, напруга діє, переважно поперек напрямку електропередачі, а струм провідності — уздовж неї. Тому ЕЕ електропередачі можна розкласти на дві умовні складові частини поздовжню — активну та поперечну — реактивну.

Як підтверджено в [1], реактивної ЕЕ як товарної продукції ЕЕС, фізично, бути не може. Але, як фізичне явище, вона спричиняє економічний збиток і споживачам ЕЕ і електропостачальним організаціям. Тому реактивне навантаження систем електропостачання (СЕР) необхідно контролювати і обмежувати за допомогою спеціальних пристроїв компенсації. Очевидно, що визначення потужності таких пристроїв є економічною задачею кожного споживача ЕЕ, завжди було і є актуальним у наш час.

Співвідношення між активною (корисною) і реактивною складовою (шкідливим баластом) ЕЕ будь-якої ЕЕС та СЕР контролюється і визначається за допомогою коефіцієнта реактивної потужності, який є відношенням

між реактивною та активною складовими повного їх навантаження за відомою формулою, в. о.:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}, \quad (1)$$

де  $Q$  — реактивна потужність системи, квар;  $P$  — активна потужність системи, кВт;  $\varphi$  — кут зсуву фаз між синусоїдальними напругою та струмом провідності струмоведучих частин системи, град.

**2. Аналіз літературних даних**

При математичному моделюванні ЕЕС, у відповідності до теореми Пойтінга, повну потужність ЕЕС можна представити у вигляді, кВА:

$$\begin{aligned} S &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2}U \sin \omega t \cdot \sqrt{2}I_m \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} [\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \omega t - \varphi)] = \\ &= U \cdot I \cos \varphi - U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $u$  — миттєве значення синусоїдальної напруги струмоведучих частин ЕЕС, кВ;  $i$  — миттєве значення струму